

## АНАЛИЗ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА ПЕРЕМЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ, СВЯЗАННОГО С ВРАЩАЮЩИМСЯ РОТОРОМ ТУРБОГЕНЕРАТОРА, В РЕЖИМАХ ХОЛОСТОГО ХОДА И КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

*Представлен численно-полевой метод расчета переменной составляющей магнитного поля на поверхности вращающегося ротора турбогенератора. Он основан на многопозиционных расчетах магнитного поля с поворотами ротора и изменениями токов в обмотке статора. В фиксированных точках поверхности выделяется переменная составляющая магнитной индукции и для ее временной функции выполнен гармонический анализ. Разработанный метод универсален с точки зрения режимов возбуждения, конструкции и насыщения магнитопровода. Теоретические основы апробированы расчетными исследованиями в режимах холостого хода и короткого замыкания турбогенератора.*

**Ключевые слова:** турбогенератор, ротор, переменная составляющая магнитного поля, численно-полевой расчет, гармонический анализ, холостой ход, короткое замыкание.

**В.І. Мілих, Н.В. Полякова**

**Аналіз гармонічного складу змінного магнітного поля, пов'язаного з обертовим ротором турбогенератора, в режимах неробочого ходу та короткого замикання**

*Подано чисельно-польовий метод розрахунку змінної складової магнітного поля на поверхні обертового ротора турбогенератора. Він заснований на багатопозиційних розрахунках магнітного поля з поворотами ротора і зміною струмів в обмотці статора. У фіксованих точках поверхні формуються часові функції змінної складової магнітної індукції і для них виконується гармонійний аналіз. Розроблений метод є універсальним з погляду режимів збудження, конструкції і насичення магнітопроводу. Теоретичні основи апробовані розрахунковими дослідженнями в режимах неробочого ходу і короткого замикання турбогенератора.*

**Ключові слова:** турбогенератор, поверхня ротора, змінна складова магнітного поля, чисельно-польовий розрахунок, гармонійний аналіз, неробочий хід, коротке замкнення.

**V.I. Milykh, N.V. Polyakova**

**Analysis of harmonic composition of the alternating magnetic field associated with the rotating rotor of a turbogenerator in the modes of no-load and short-circuits**

*The method of calculating the alternating component of the magnetic field at the surface of the rotating rotor of a turbogenerator is presented. It is based on multiposition numerical calculations of the magnetic field with the turns of rotor and changes of currents in the stator winding. Discrete time functions of the alternating component of the magnetic induction are selected in points of the surface. For them, the harmonic analysis is conducted. The developed method is universal in terms of modes of excitation, designs and saturation of the magnetic core. The theory is confirmed by computational researches in the modes of no-load and short circuit of a large turbogenerator. In it, the alternating component of the magnetic induction on the rotor surface in the short-circuit mode is on an order of magnitude greater than in the no-load mode. Values and harmonic composition of the alternating component of the magnetic induction differ substantially at different points of the rotor surface. Harmonics are ponderable in the range from the level determined by the phase structure of stator winding to the level determined by the tooth structure of its core. The results obtained are qualitatively fit into the classical notion of oscillatory processes of the magnetic field on the rotor surface, but now the value and harmonic composition of the alternating component of the magnetic induction are received adequate numerical filling. The result of work can be used for designing of a turbogenerators and other synchronous machines.*

**Key words:** turbogenerator, surface of rotor, alternating component of the magnetic field, numerical field calculation, numerical calculation of magnetic field, harmonic analysis, no-load, idling, short - circuit.

**Введение.** В синхронных машинах, в том числе и турбогенераторах (ТГ), на основное магнитное поле, являющееся постоянным относительно вращающегося ротора, накладываются переменные магнитные поля, возникающие по разным причинам [1-3]. Это приводит к дополнительным потерям мощности, которые локализуются на поверхности массивного ротора.

При расчетах ТГ [2] рассматриваются три вида потерь на поверхности бочки ротора: 1) потери от высших гармоник магнитного поля обмотки статора при коротком замыкании (КЗ); 2) потери от зубцовых гармоник обмотки статора при КЗ; 3) потери от зубчатости статора при холостом ходе (ХХ).

В основу расчетов поверхностных потерь ротора в теории синхронных машин [1, 2] положена переменная составляющая магнитной индукции (ПСМИ). Ее расчеты базируются на простейших одномерных моделях магнитного поля в развернутом зазоре при весьма условном учете насыщения магнитопровода и с использованием условных ступенчатых координатных функций магнитодвижущей силы обмотки статора. Кроме того, сердечник ротора считается гладким и по всей его поверхности характер временных изменений ПСМИ считается неизменным, магнитные поля ротора и статора рассматриваются отдельно.

Таким способом выявляется принципиальная суть наличия переменных магнитных полей на поверхности ротора ТГ, но быть уверенным в достоверности числовых зна-

чений соответствующих величин не приходится ввиду наличия отмеченных и прочих серьезных допущений.

Отказаться от ряда допущений, серьезно влияющих на результаты расчета магнитных полей и их гармонического анализа в условиях электрических машин практически любых типов, позволяют численные методы расчета этих полей в сочетании с современным компьютерным программным обеспечением. Это уже было показано в [4, 5] при проведении гармонического анализа магнитного потокосцепления и ЭДС обмотки статора ТГ. Продолжением этих исследований, но уже применительно к ПСМИ на поверхности вращающегося ротора ТГ, является решаемая здесь задача.

**Постановка задачи.** Целью работы является разработка метода численно-полевого расчета и гармонического анализа временных функций ПСМИ на поверхности вращающегося ротора ТГ и представление соответствующего практического расчетного анализа на примере крупного ТГ.

Для расчетов взят ТГ [3, 5] с номинальными данными: активная мощность – 200 МВт; фазное напряжение  $U_{sN} = 9093$  В; фазный ток  $I_{sN} = 10135$  А; коэффициент мощности – 0,85; частота  $f_s = 50$  Гц. Его число фаз  $m_s = 3$ ; число пар полюсов  $p=1$ ; активная длина – 5,286 м; немагнитный зазор – 0,1 м; диаметр ротора – 1,075 м; относительное укорочение обмотки статора – 0,8; числа последовательных витков фазной обмотки статора – 10, обмотки ротора – 180.

Особенностью этого ТГ является относительно небольшое число зубцов статора:  $Q_s = 30$ , благодаря чему расчеты оказываются более наглядными ввиду явно выраженных зубцовых гармоник ПСМИ.

Расчетная модель электромагнитной системы представленного ТГ показана на рис.1. Здесь в поперечном сечении обозначены: фазные зоны обмотки статора  $A-A'$ ,  $B-B'$  и  $C-C'$ , выделенные различной тональностью;  $r$ ,  $\alpha$  – полярная система координат;  $d$  – продольная ось ротора. Показаны также обозначения и направления тока обмотки возбуждения  $I_f$  и мгновенных фазных токов обмотки статора  $i_A$ ,  $i_B$ ,  $i_C$ , соответствующие режиму номинальной нагрузки.

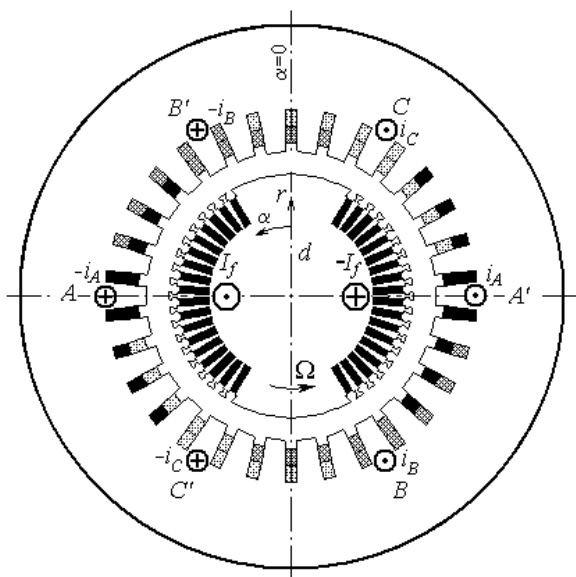


Рис. 1. Расчетная модель турбогенератора

**Принцип расчета переменного магнитного поля**, связанного с вращающимся ротором ТГ, не зависит от режима его возбуждения и основывается на многопозиционных численных расчетах квазистационарного магнитного поля. При этом основным

допущением является то, что реакция вихревых токов в сердечнике ротора на переменное магнитное поле не учитывается.

В поперечном сечении ТГ квазистационарное магнитное поле описывается известным дифференциальным уравнением [6]

$$\text{rot} \left[ \frac{1}{\mu} \text{rot} (\vec{k} A_z) \right] = \vec{k} J_z, \quad (1)$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость;  $A_z$ ,  $J_z$  – аксиальные составляющие векторного магнитного потенциала (ВМП) и плотности тока;  $\vec{k}$  – орт по аксиальной оси  $z$ .

На границе области расчета – внешней поверхности сердечника статора принималось граничное условие Дирихле  $A_z = 0$ . Численный расчет магнитного поля проводится методом конечных элементов по общедоступной программе FEMM [7].

Для выделения временных функций ПСМИ  $B_t(t)$  на поверхности ротора, обеспечивается его вращение (со своим магнитным полем) с угловой скоростью  $\Omega$  синхронно с полем трехфазной обмотки статора.

Непрерывная временная функция  $B_t(t)$  заменяется дискретной

$$B_t(t_k), \quad k = 1, 2, \dots, K_{min}, \quad (2)$$

где  $K_{min}$  – минимальное число позиций ротора, позволяющее сформировать конкретные временные функции ПСМИ на их периоде изменения.

Заданному временному ряду с шагом  $\Delta t$

$$t_k = \Delta t (k - 1); \quad k = 1, 2, \dots, K_{min}, \quad (3)$$

соответствует ряд угловых позиций ротора

$$\alpha_k = \Delta\alpha(k-1); \quad k=1,2,...,K_{min}, \quad (4)$$

с шагом  $\Delta\alpha=\Omega\cdot\Delta t$ .

Синхронные повороты магнитного поля статора обеспечиваются вычислением фазных токов обмотки статора в те же моменты времени  $t_k$  (3)

$$\begin{aligned} i_A &= I_m \cos(\omega t_k + \beta); \\ i_B &= I_m \cos(\omega t_k - \frac{2}{3}\pi + \beta); \\ i_C &= I_m \cos(\omega t_k + \frac{2}{3}\pi + \beta), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $I_m = \sqrt{2}I_s$  – их амплитуда;  $I_s$  – действующее значение фазного тока;  $\omega = 2\pi f_s$  – угловая частота;  $\beta$  – угловое смещение оси, по которой в конкретно рассматриваемом режиме возбуждения ТГ должна действовать МДС трехфазной обмотки статора, по отношению к продольной оси ротора  $d$ .

Повороты ротора (4), изменения токов в обмотке статора (5) и сбор информации после расчета магнитного поля в каждой конкретной позиции при работе программы FEMM осуществлялись автоматически при посредстве управляющей программы, написанной на алгоритмическом языке Lua.

Программа FEMM дает полные значения магнитной индукции, содержащие в себе как постоянную, так и переменную составляющие. Так для любой заданной точки на поверхности ротора, вращающейся вместе с ним, формируется массив полных значений магнитной индукции

$$B(t_k), \quad k=1,2,...,K_{min}. \quad (6)$$

Из этих значений выделяется ПСМИ и получается в виде числового массива соот-

ветствующая дискретная временная функция для конкретной точки:

$$B_t(t_k) = B(t_k) - B_{av}, \quad k=1,2,...,K_{min}, \quad (7)$$

где среднее полное значение магнитной индукции для данной точки

$$B_{av} = \frac{1}{K_{min}} \sum_{k=1}^{K_{min}} B_k. \quad (8)$$

**Расчетный анализ ПСМИ в режиме XX** проводился при токе возбуждения  $I_f$ , составляющем 826,8 А и обеспечивающем номинальное напряжение  $U_{sN}$ .

При расчетах, в первую очередь, возникла задача выявления необходимого уровня дискретизации расчетной области конечно-элементной структурой.

Для выявления устойчивости расчетов ПСМИ, сначала они были проведены при повороте ротора в пределах пяти зубцовых делений статора – для режима XX это избыточный интервал времени (он станет достаточным для периода изменения ПСМИ в режиме возбуждения от обмотки статора).

При конкретных расчетах на расстоянии 2 мм от поверхности ротора задан ряд точек, которые показаны и пронумерованы на рис.2. Здесь ротор, как и на рис.1, находится в исходной позиции при  $t = 0$  и  $\alpha = 0$ .

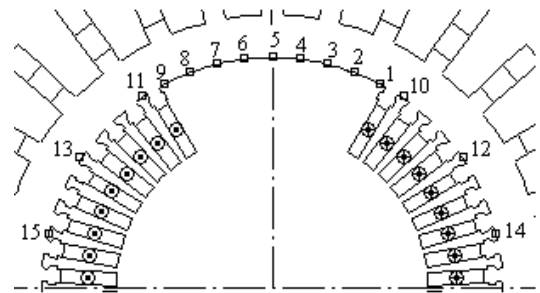


Рис.2. Распределение точек наблюдения на поверхности ротора

Расчеты проводились при разных уровнях дискретизации области расчета конечно-элементной структурой. При грубой структуре – относительно больших размерах треугольников, значения ПСМИ были визуально нестабильны. Так в средней части большого зуба устойчивые графики временных функций стали получаться при уровне дискретизации в области зубцовой зоны ротора, показанном на рис.3 фрагментом между краями большого (*b*) и обычного (*c*) зубцов. На участках *a*, *b*, *c* и *d* размеры сторон треугольников ограничены рядом 2–2–8–8 мм.

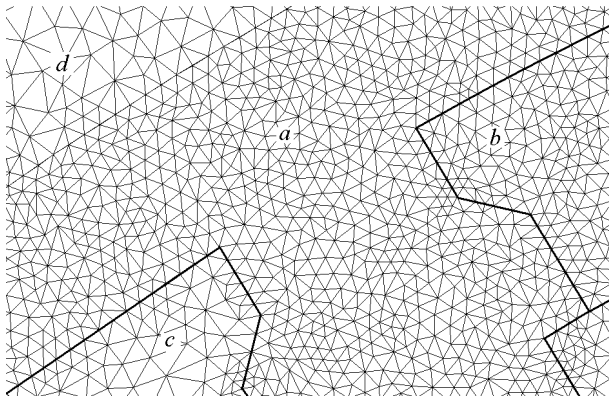


Рис.3. Фрагмент области расчета с относительно грубой конечно-элементной структурой

В зонах, удаленных от точек наблюдения, треугольники имели большие размеры – всего в области расчета (рис.1) оказалось 52025 узлов и 103768 треугольников. Расчет магнитного поля в одной позиции ротора с учетом насыщения магнитопровода по программе FEMM на компьютере среднего уровня (2,8 ГГц) длился 1 мин. 40 с.

При расчетах угол поворота ротора  $\Delta\alpha$  между фиксированными позициями выбран довольно малым и составлял  $0,5^\circ$ , чем обеспечивалась достаточная детализация вре-

менных функций ПСМИ. Таким образом, в пределах поворота ротора на пять зубцовых делений статора, т.е. на  $60^\circ$ , число расчетных точек составило 121, а временной шаг  $\Delta t$  оказался равным  $1/720$  периода вращения ротора  $T$ .

Магнитное поле обмотки ротора, рассчитанное для момента времени  $t_k$  после его поворота на  $12^\circ$ , показано на рис.4 линиями равного ВМП при его нормировке указанным максимальным значением  $A_{max}$ .

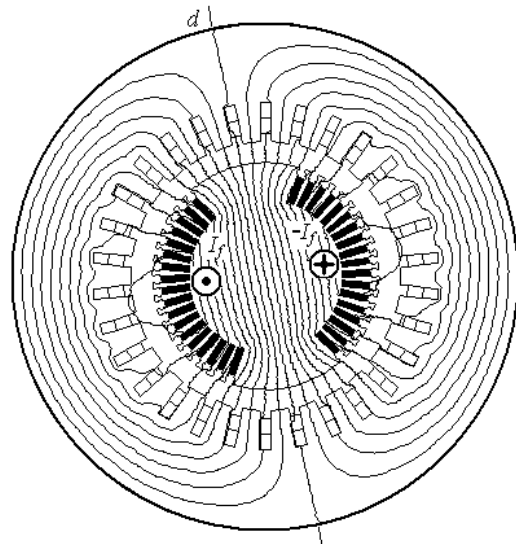


Рис. 4. Картина магнитного поля ТГ в режиме XX при повернутом роторе на угол  $\alpha=12^\circ$  ( $A_{max} = 0,4753$  Вб/м)

В качестве ПСМИ анализировалась сформированная на основе (7) радиальная пространственная составляющая магнитной индукции, которая, по сути, является нормальной составляющей к дуге поверхности ротора, т.е. это временная функция

$$B_{rt}(t_k); \quad k=1,2,\dots,K_{min}. \quad (9)$$

Графики функции (9) даны на рис.5 в интервале времени поворота ротора на упомянутые уже  $60^\circ$ . Эти графики соответству-

ют точкам в средней части большого зуба с указанными на рис.2 номерами. В целом представленные временные функции ПСМИ достаточно стабильны с очевидной периодической структурой, хотя есть и некоторая относительно небольшая локальная неустойчивость, что можно связать с дискретностью конечно-элементной структуры. Она перестраивается программой FEMM при переходе от одной позиции в следующую автоматически.

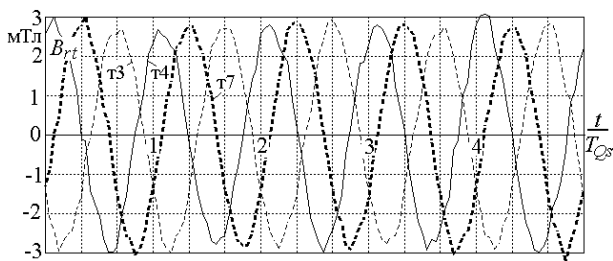


Рис.5. Временные функции ПСМИ в режиме XX на поверхности большого зуба ротора

В теории ТГ [2] для колебаний магнитного потока от зубчатости статора при XX учитываются лишь первые зубцовые гармоники порядка

$$v_{Qs} = \frac{Q_s}{p} \pm 1, \quad (10)$$

а частота колебаний ПСМИ

$$f_{Qs} = \frac{f_s Q_s}{p}. \quad (11)$$

Этому соответствует представленный на рис.5 колебательный процесс, где имеется явно выраженная зубцовая (по сердечнику статора) ПСМИ. Период изменения ПСМИ в режиме XX  $T_{Qs}$  соответствует повороту ротора на одно зубцовое деление статора и, значит, частоте  $f_{Qs}$  (11), т.е.  $T_{Qs} = T / Q_s$ . На

рис.5 время дано в относительных единицах (о.е.), оно захватывает пять периодов  $T_{Qs}$ .

Относительная «гладкость» функций ПСМИ в пределах большого зуба ротора (рис.5) нарушается на поверхности обычных зубцов. Об этом свидетельствуют графики на рис.6, аналогичные графикам на рис.5, но соответствующие теперь точкам 10 и 11, указанным на рис.2. Здесь по-прежнему угадываются наличие и периодичность временных функций ПСМИ, но всю картину портят сильные пульсации, вызванные упоминавшейся уже дискретностью изменяющейся конечно-элементной структуры.

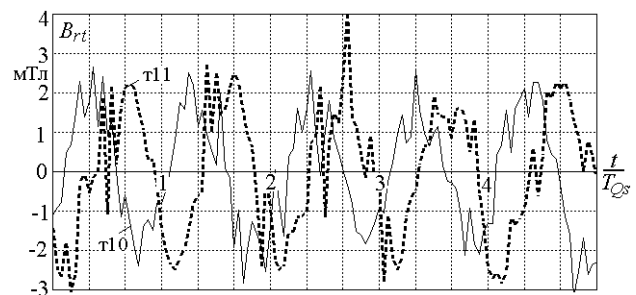


Рис.6. Временные функции ПСМИ в режиме XX на поверхности обычных зубцов ротора

Для уменьшения «стихийных» пульсаций ПСМИ была использована более детализированная конечно-элементная структура, которая показана на рис.7 для той же зоны, что и на рис.3. Здесь на участках *a*, *b*, *c* и *d* размеры сторон треугольников ограничены до 1–2–1–4 мм. Всего на область расчета пришлось 132675 узлов и 265068 треугольников, а расчет магнитного поля в одной позиции длился уже 8,5 мин.

Результаты расчета ПСМИ для указанных конкретных точек в расширенном составе представлены на рис.8 и рис.9, но уже

для большей наглядности формы графиков – в пределах одного периода  $T_{Qs}$ .

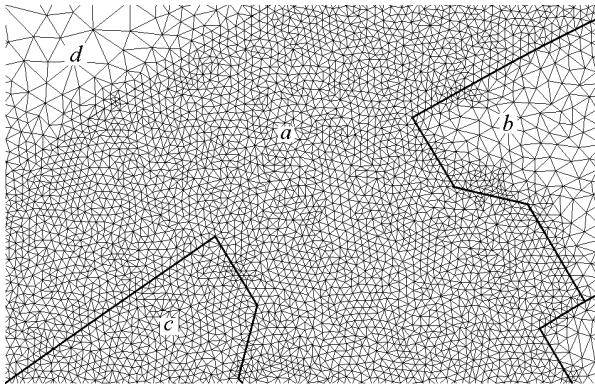


Рис.7. Фрагмент области расчета с уточненной конечно-элементной структурой

Из рис.8 очевидно, что функции ПСМИ для точек 3, 5 и 7 в пределах средней части большого зуба сохранили свой характер, как и на рис.5 – относительные гладкость и стабильность при некоторых пульсациях. Для точек 1 и 9 на краю большого зуба «стихийные» пульсации более выражены, вероятно, из-за увеличенных изменений в перестраиваемой конечно-элементной структуре.

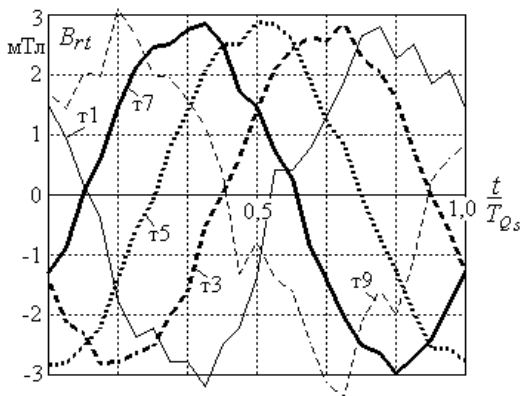


Рис.8. Временные функции ПСМИ при XX на периоде их изменения на поверхности большого зуба ротора

Ситуация для ПСМИ на поверхности обычных зубцов по сравнению с рис.6 улучшилась, что видно из рис.9, однако результаты расчетов еще нельзя признать

вполне удовлетворительными, особенно для точек 14 и 15, в которых уровень ПСМИ весьма мал и пульсации накладывают серьезную погрешность.

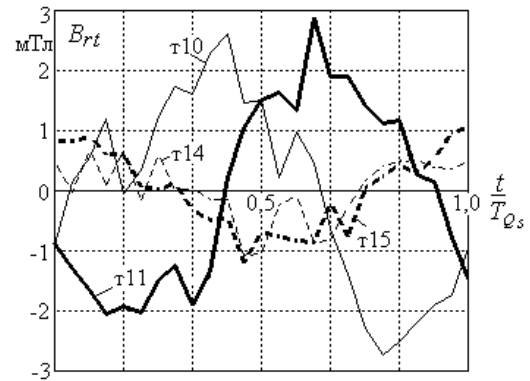


Рис.9. Временные функции ПСМИ в пределах периода их изменения в режиме XX в на поверхности обычных зубцов ротора

Средние значения магнитной индукции (8) и максимальные значения  $B_{rt max}$  ее переменной составляющей (9) для рассмотренных точек даны в табл.1. Очевидна разнообразность этих значений в зависимости от места расположения на поверхности ротора.

Таблица 1. Средние значения магнитной индукции и максимальные значения ПСМИ по указанным точкам

№ точки	XX		КЗ	
	$B_{av}$ , Тл	$B_{rt max}$ , мТл	$B_{av}$ , Тл	$B_{rt max}$ , мТл
1	1,002	2,80	0,738	20,14
2	0,844	2,81	0,727	17,77
3	0,835	2,88	0,758	16,18
4	0,834	2,87	0,778	15,24
5	0,834	2,88	0,785	13,39
6	0,834	2,91	0,778	13,48
7	0,835	2,86	0,758	15,02
8	0,845	2,83	0,727	16,16
9	1,001	3,09	0,737	19,64
10	0,741	2,61	0,642	17,61
11	0,740	2,87	0,642	17,16
12	0,460	1,26	0,437	16,88
13	0,460	1,36	0,436	16,05
14	0,175	0,68	0,176	16,49
15	0,175	1,04	0,172	12,36

В принципе, результаты для ПСМИ получены и проблема их численного расчета выявлена. При необходимости – для улучшения точности расчетов можно продолжить эксперименты, если предпринимаемые затраты времени будут адекватны результативности проводимых исследований.

**Расчетный анализ ПСМИ в режиме КЗ** проводился при токе обмотки статора  $I_s$ , обеспечивающем номинальное напряжение  $U_{sN}$  при отсутствии тока в обмотке ротора. Конкретно этот ток составил 5857 А, что заметно меньше номинального значения. При задании мгновенных токов по (5) принято  $\beta = 0$ , благодаря чему магнитное поле обмотки статора было ориентировано по продольной оси ротора.

Картина магнитного поля обмотки статора представлена на рис.10 – она получена после поворота ротора за время, равное периоду изменения ПСМИ.

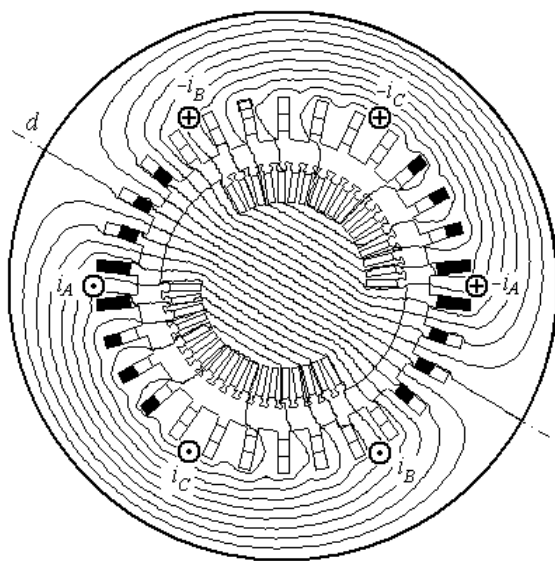


Рис. 11. Картина магнитного поля ТГ в режиме КЗ при повернутом роторе на угол  $\alpha=60^\circ$   
( $A_{max} = 0,4276$  Вб/м)

Расчетами магнитного поля при последовательных поворотах ротора (4) и изменениях токов статора (5) в заданные моменты времени (3) было выявлено, что период пространственного изменения ПСМИ составляет  $\tau_t = \tau_p / m_s$  ( $\tau_p$  – полюсное деление ТГ), а во временном выражении –  $T_t = T / (2m_s)$ , частота  $f_{s1} = 2m_s f_s$ . В угловой мере это составляет  $60^\circ$ .

Физической основой колебания ПСМИ в точках, связанных с поверхностью ротора, с частотой  $f_{s1}$  является неравномерное распределение по пазам статора максимальных значений полных токов, что показано на рис.11. В тех пазах, где лежат стержни одной фазной обмотки, уровень токов достигает  $2 \cdot I_m$ , в остальных –  $\sqrt{3} \cdot I_m$ .

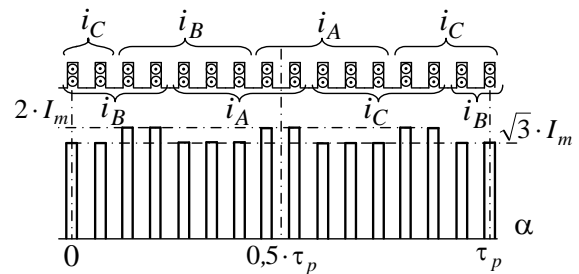


Рис.11. Распределение максимальных значений полных токов по пазам статора

Отметим, что, в соответствии с [2], гармоники магнитного поля обмотки статора с условно гладкой поверхностью его сердечника при КЗ имеют порядок

$$v_s = 6 \cdot k \pm 1, \quad (k = 1, 2, 3 \dots) \quad (12)$$

и индуцируют в роторе токи частоты  $f_{sv} = 6v_s f_s$ , где  $f_s$  – упоминавшаяся уже частота основной гармоники токов статора.



Представленные выше период  $T_t$  и частота  $f_{s1}$  соответствуют первой гармонике, т.е.  $v_s = 1$ .

Кроме того, в [2] рассматриваются отдельно зубцовые гармонические составляющие магнитного поля обмотки статора при КЗ и при этом учитывают только их первые составляющие порядка  $v_{Qs}$ , аналогично (10).

Графики ПСМИ в режиме КЗ на периоде ее изменения  $T_t$  представлены на рис.12 – для точек в пределах большого зуба ротора, а также на рис.13 – для обычных зубцов. Здесь расчетами единого магнитного поля сразу учтены обе причины возникновения ПСМИ в режиме КЗ – фазная структура обмотки статора и зубчатая структура его сердечника. Очевидно из рис.12 и рис.13, что в режиме КЗ на колебания ПСМИ с основной частотой  $f_{s1}$  накладываются колебания зубцовых гармоник с частотой  $f_{Qs}$ .

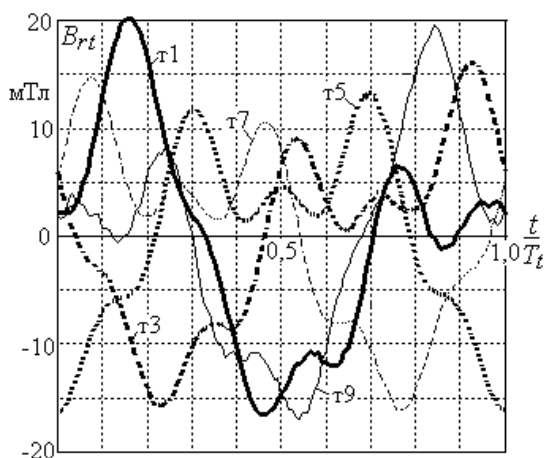


Рис.12. Временные функции ПСМИ при КЗ в пределах периода их изменения на поверхности большого зуба ротора

Расчеты проведены при уровне дискретизации области расчета, показанном на рис.3. Уже при этом уровне кривые ПСМИ являются достаточно устойчивыми. Это объясняется тем, что в режиме КЗ значения ПСМИ оказались на порядок выше, чем в режиме ХХ. На фоне возросших значений ПСМИ расчетные колебания из-за изменений конечно-элементной структуры при поворотах ротора стали менее заметными.

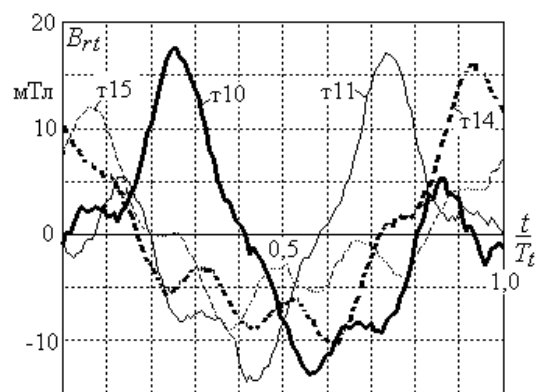


Рис.13. Временные функции ПСМИ в пределах периода их изменения в режиме КЗ на поверхности обычных зубцов ротора

Средние значения магнитной индукции (8) и максимальные значения ПСМИ (9) для режима КЗ даны в той же табл.1: они весьма разнообразны для рассмотренных точек на поверхности ротора.

Сложный характер временных функций ПСМИ свидетельствует об их широком гармоническом спектре. Разнородность и несимметрия функций ПСМИ вызваны различным расположением точек наблюдения в пределах поверхности ротора, а также влиянием насыщения магнитопровода.

**Гармонический анализ ПСМИ** выполнен на основе разложения дискретно-

числовой временной функции  $B_{rt}(t_k)$  (9) в косинусный ряд Фурье [10]

$$B_{rt} = \sum_{v=1,2,3,\dots}^{N_g} B_{m,v} \cos(v\omega t + \zeta_v). \quad (13)$$

Амплитуды и аргументы гармоник

$$B_{m,v} = \sqrt{s_v^2 + c_v^2}; \quad \zeta_v = -\arctg(s_v / c_v) \quad (14)$$

определяются по данным (9) через коэффициенты частных синусного и косинусного рядов для гармонической составляющей с текущим номером  $v$ :

$$s_v = \frac{2}{K} \sum_{k=1}^K B_{rt,k} \sin(v\omega t_k);$$

$$c_v = \frac{2}{K} \sum_{k=1}^K B_{rt,k} \cos(v\omega t_k). \quad (15)$$

Ввиду отсутствия симметрии функции в пределах периода, ряд (13) содержит и четные, и нечетные гармоники. Предельный номер гармоники  $N_g$  не должен превышать половины выбранного для (15) числа значений  $K$ , которое, в свою очередь, не превышает  $K_{min}$  из (9). Так, при повороте ротора и магнитного поля за время  $T/6$  с шагом  $0,5^\circ$  число  $K$  составляло 120, а  $N_g = 60$ , при повороте за  $T/Q_s - K = 24$ , а  $N_g = 12$ .

Номера гармоник  $v$  в (13) соответствуют периодичности функций ПСМИ  $B_{rt}(t_k)$  в конкретном расчетном режиме. Так периоду  $T_t$  в режиме КЗ соответствует первая гармоника  $v=1$ . Если же за первую гармонику принять основную гармонику главного магнитного поля ТГ, изменяющегося с периодом  $T$  и имеющую номер  $v_s$  (12), то каждая гармоника  $v$  ПСМИ связана с  $v_s$  так:

$$v_s = 2m_s v = 6 \cdot v. \quad (16)$$

В режиме ХХ период изменения ПСМИ  $T_{Q_s}$  составляет  $T/Q_s$  и в данном случае каждая гармоника ПСМИ  $v$  из (13) связана с  $v_{Q_s}$  (10) таким образом:

$$v_{Q_s} = Q_s \cdot v = 30 \cdot v. \quad (17)$$

**Расчетный анализ гармонического состава** ПСМИ проведен для упомянутых уже режимов ХХ и КЗ. Результаты разложения функций ПСМИ в гармонический ряд (13) представлены в табл.2–5. Амплитуды гармоник ПСМИ даются в основном в относительных значениях

$$B_{m,v}^* = B_{m,v} / B_{m,1}, \quad (18)$$

где за базу принимается амплитуда первой гармоники  $B_{m,1}$  для конкретного режима и конкретной точки.

В табл.2 дан гармонический состав для режима ХХ в точке 5 по 24 интервалам поворота ротора в пределах зубцового деления статора, т.е. в пределах периода  $T_{Q_s}$ . Соответственно оперировать можно только с 12-тью гармониками. Амплитуда первой зубцовой гармоники  $B_{m,1}$  для (18) составляет 2,84 мТл. Очевидно, что преобладает первая зубцовая гармоника, хотя есть и гармоники более высокого порядка.

Таблица 2. Гармонический состав ПСМИ в точке 5 при ХХ

$v$	$B_{m,v}^*$	$v$	$B_{m,v}^*$	$v$	$B_{m,v}^*$	$v$	$B_{m,v}^*$
1	1,000	2	0,014	3	0,017	4	0,014
5	0,026	6	0,021	7	0,014	8	0,018
9	0,025	10	0,015	11	0,007	12	0,005

В табл.3 представлены данные гармонического анализа в режиме ХХ по наиболее весомым пяти начальным гармоникам для точек в пределах большого зуба ротора, в которых графики ПСМИ относительно стабильны (рис.8). Видно, что данные для различных точек заметные отличаются.

Таблица 3. Основные гармоники ПСМИ по указанным точкам  $m$  для режима ХХ

$m$	$B_{m,1}$ , мТл	$B_{m,2}^*$	$B_{m,3}^*$	$B_{m,4}^*$	$B_{m,5}^*$	$d_{dist}$
2	2,85	0,007	0,017	0,007	0,021	0,998
3	2,81	0,012	0,016	0,005	0,016	0,998
4	2,88	0,033	0,023	0,015	0,014	0,997
5	2,84	0,014	0,017	0,014	0,026	0,998
6	2,84	0,011	0,025	0,018	0,034	0,998
7	2,81	0,011	0,014	0,007	0,037	0,998
8	2,88	0,013	0,038	0,007	0,038	0,997

Роль высших гармоник оценивается коэффициентом искажения кривых ПСМИ

$$d_{dist} = \frac{B_{m,1}}{\sqrt{\sum_{v=1,2,3 \dots}^{Ng} B_{m,v}^2}}, \quad (19)$$

значения которого в табл.3 близки к единице, т.е. роль первой гармоники является преобладающей.

В табл.4 представлены для точки 5 амплитуды гармонического ряда ПСМИ для режима КЗ, где за базу принята амплитуда первой гармоники  $B_{m,1} = 9,00$  мТл. Эти данные получены по 120 интервалам поворота ротора и магнитного поля в пределах периода  $T_r$ . Из 60 возможных гармоник показаны те, уровень которых не меньше 0,003 о.е.

Очевидно, что весомыми являются гармоники вплоть до пятой, которая, в соответ-

ствии с (16), в абсолютном исчислении является тридцатой, т.е. зубцовой. Но, кроме первой, наиболее заметна вторая гармоника, хотя и в меньшей степени.

Таблица 4. Гармонический состав ПСМИ в точке 5 при КЗ

$v$	$B_{m,v}^*$	$v$	$B_{m,v}^*$	$v$	$B_{m,v}^*$	$v$	$B_{m,v}^*$
1	1,000	2	0,692	3	0,205	4	0,050
5	0,353	6	0,004	7	0,003	10	0,004
16	0,003	18	0,003	19	0,003	22	0,003
24	0,006	26	0,004	27	0,003	30	0,006
34	0,003	37	0,004	46	0,004	47	0,004

В табл.5 представлены данные гармонического анализа для всех пятнадцати точек на поверхности ротора (рис.2) по начальным пяти гармоникам, как и в табл.3, но теперь для режима КЗ.

Таблица 5. Основные гармоники ПСМИ по точкам при КЗ

$m$	$B_{m,1}$ , мТл	$B_{m,2}^*$	$B_{m,3}^*$	$B_{m,4}^*$	$B_{m,5}^*$	$d_{dist}$
1	11,33	0,636	0,192	0,043	0,283	0,810
2	9,93	0,651	0,205	0,057	0,327	0,796
3	9,49	0,652	0,214	0,049	0,333	0,794
4	9,15	0,676	0,221	0,050	0,352	0,783
5	9,00	0,692	0,205	0,050	0,353	0,779
6	9,12	0,673	0,213	0,052	0,350	0,785
7	9,33	0,661	0,209	0,054	0,346	0,790
8	9,52	0,679	0,202	0,059	0,342	0,785
9	10,58	0,698	0,195	0,055	0,304	0,785
10	8,97	0,648	0,209	0,071	0,293	0,801
11	8,58	0,708	0,199	0,052	0,330	0,777
12	9,13	0,467	0,113	0,050	0,274	0,873
13	8,83	0,465	0,126	0,046	0,275	0,873
14	9,96	0,324	0,052	0,045	0,224	0,928
15	6,52	0,472	0,062	0,069	0,347	0,859

Значения коэффициента искажения в табл.5 заметно отличаются от единицы, т.е.

при КЗ роль высших гармоник в ПСМИ оказывается весьма существенной.

Показанные в табл.3 первые гармоники ( $v=1$ ) соответствуют пятым гармоникам ( $v=5$ ) из табл.5, так как, исходя из (16), (17), получается  $v_s = v_{Qs} = 30$ , а в целом – это зубцовые гармоники (10) с несущей частотой  $f_{Qs}$ .

В табл.3 и табл.5 расхождение данных между симметричными относительно продольной оси ротора точками (рис.2), например 1 и 9, 2 и 8, 10 и 15 и т.д. указывают на уровень расчетной погрешности, свойственный результатам расчета ПСМИ для этих точек.

Нетрудно предположить, что при ином, по сравнению с рис.11, направлении магнитного поля обмотки статора, по отношению к продольной оси ротора, значения и гармонический состав ПСМИ в рассмотренных точках существенно изменятся. Ориентация магнитного поля обмотки статора предопределяется углом  $\beta$  в (5), который в режиме номинальной нагрузки может составлять  $155-158^\circ$  [4, 5]. Т.е. абстрагированный от реальных параметров и условий работы ТГ расчет ПСМИ и соответствующих потерь мощности в поверхностном слое бочки ротора в [2] является весьма условным и не приносящим адекватных численных значений.

### Выводы.

1. Разработанный метод расчета переменной составляющей магнитной индукции

в точках на поверхности вращающегося ротора является наиболее детерминированным и универсальным: он основан на численно-полевым многопозиционным расчете магнитного поля, который связан с минимумом допущений и учитывает конкретно рассматриваемый режим возбуждения, реальную геометрию электромагнитной системы и насыщение магнитопровода электрической машины.

2. В рассмотренном турбогенераторе ПСМИ на поверхности ротора в режиме КЗ примерно на порядок больше, чем при ХХ. Относительно малые значения ПСМИ в режиме ХХ могут существенно искажаться из-за конечно-элементной дискретной структуры расчетной модели области расчета.

3. Проведенные расчеты показали, что в разных точках на поверхности ротора значения и гармонический состав переменной составляющей магнитной индукции существенно отличаются, особенно в режиме КЗ.

4. Проведенный гармонический анализ переменной составляющей магнитного поля на поверхности вращающегося ротора укладывается в классическое представление о существовании двух основных колебательных процессов – с несущими частотами, порожденными фазной структурой обмотки статора и зубчатой структурой его сердечника. Но теперь значения и гармонический состав ПСМИ получают конкретное числовое наполнение.

5. В рассмотренных временных функциях переменной составляющей магнитной индукции присутствует весьма широкий спектр гармоник, но наиболее весомыми являются гармоники в диапазоне от уровня,

определяемого фазной структурой обмотки статора, до уровня, определяемого зубцовой структурой его сердечника.

### Список литературы

1. Вольдек А.И. Электрические машины / А.И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
2. Титов В.В. Турбогенераторы / В.В. Титов, Г.М. Хуторецкий, Г.А. Загородная, Г.П. Вартаньян, Д.И. Заславский, И.А. Смотров. – Л.: Энергия, 1967. – 895 с.
3. Зозулін Ю.В. Створення нових типів та модернізація діючих турбогенераторів для теплових електричних станцій // Ю.В.Зозулін, О.Є.Антонов, В.М.Бичік, А.М.Боричевський, К.О.Кобзар, О.Л.Лівшиць, В.Г.Ракогон, І.Х.Роговий, Л.Л.Хаймович, В.І.Чередник. – Харків: ПФ «Колегіум», 2011. – 228 с.
4. Милых В.И. Принцип численно-полевого анализа гармонического состава ЭДС в турбогенераторе/ В.И. Милых, Н.В. Полякова // Электрика, Россия. – 2012. – №5. – С.2-5.
5. Милых В.И. Гармонический анализ электромагнитных величин трехфазной обмотки статора турбогенератора на основе классических и численно-полевых методов / В.И. Милых, Н.В. Полякова // Технічна електродинаміка. – 2013. – №3. – С.40-49.
6. Милых В.И. Определение электромагнитных параметров электрических машин на основе численных расчетов магнитных полей / В.И. Милых, Н.В. Полякова // Електротехніка і електромеханіка. – 2006. – №2. – С.40-46.
7. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. FEMM 4.2 32 bit Executable (11 apr 2012) [Электронный ресурс] : Режим доступа : <http://www.femm.info/wiki/Download>. – 2013.
8. Милых В.И. Система направлений и фазовых соотношений электромагнитных величин при численных расчетах магнитных полей в турбогенераторе / В.И. Милых, Н.В. Полякова // Електротехніка і електромеханіка. – 2011. – №5. – С.33-38.
9. Милых В.И. Организация численного расчета магнитного поля турбогенератора в режиме нагрузки с обеспечением заданных его выходных параметров / В.И. Милых,

Н.В. Полякова // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – №1. – С.36-41.

10. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1973. – 832 с.

### Spisok literatury

1. Voldek A.I. Elektricheskiye mashiny / A.I. Voldek. – L.: Energiya, 1978. – 832 p.
2. Titov V.V. Turbogeneratory / V.V. Titov, G.M. Hutoreckij, G.A. Zagorodnaja, G.P. Vartan'jan, D.I. Zaslavskij, I.A. Smotrov. – L.: Energiya, 1967. – 895 p.
3. Zozulin Yu.V. Stvorenniya novykh typiv ta modernizatsiya diyuchykh turboheneratoriv dlya teplovykh elektrichnykh stantsiy // Yu.V.Zozulin, O.Ye.Antonov, V.M.Bychik, A.M.Borychevs'kyy, K.O.Kobzar, O.L.Livshyts', V.H.Rakohon, I.Kh.Rohovyy, L.L.Khaymovych, V.I.Cherednyk. – Kharkiv: PF «Kolehium», 2011. – 228 p.
4. Milykh V.I. Princip chislenno-polevogo analiza garmonicheskogo sostava JeDS v turbogeneratore / V.I. Milyh, N.V. Poljakova // Jelektrika, Ros-sija. – 2012. – №5. – P.2-5.
5. Milykh V.I. Garmonicheskyy analiz elektromag-nitnykh velichin trekhfaznoy ob-motki statora tur-bogeneratora na osnove klassicheskikh i chislenno-polevykh metodov / V.I. Milykh, N.V. Polyakova // Tekhnichna elektrodinamika. – 2013. – №3. – P.40-49.
6. Milykh V.I. Opredeleniye elektromag-nitnykh parametrov elektricheskikh mashin na osnove chislennykh raschetov magnitnykh poley / V.I. Mi-lykh, N.V. Polyakova // Elektrotekhnika i el-ektromekhanika. – 2006. – №2. – P.40-46.
7. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. FEMM 4.2 32 bit Executable (11 apr 2012) [el-ektronnyj resurs] : rezhim dostupa : <http://www.femm.info/wiki/Download>. – 2013.
8. Milykh V.I. Sistema napravleniy i fazovykh sootnosheniy elektromagnitnykh velichin pri chislennykh raschetakh magnitnykh poley v turbo-generatore / V.I. Milykh, N.V. Polyakova // El-ektrotekhnika i elektromekhanika. – 2011. – №5. – P.33-38.
9. Milykh V.I. Organizatsiya chislennogo rascheta magnitnogo polya turbogeneratora v rezhime nagruzki s obespecheniyem zadannykh ego vykhodnykh parametrov / V.I. Milykh, N.V. Polyakova // Elektrotekhnika i elektromekhanika. – 2012. – №1. – P.36-41.
10. Korn G. Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov / G. Korn, T. Korn. – M.: Nauka, 1973. – 832 p.

Поступила 3.07.2013

